

LA SPIEGAZIONE CHIMICA DEL VIVENTE Neo riduzionismo o suo superamento?

di Giovanni Villani*

L'approccio chimico al vivente, lungo il percorso dalla chimica biologica alla biochimica e, infine, alla biologia molecolare, ha cercato di mettere in relazione la prospettiva meccanica di una materia passiva con la prospettiva chimica di una materia attiva, approcci da sempre presenti, e spesso contrapposti, nel discorso sul vivente.

Oggi giorno, questi due approcci al vivente possono trovare una sintesi in un'ottica chimica che tiene conto delle riflessioni generali sulla complessità e sulla sistemica, in un'ottica della «complessità sistemica» che permetta di superare l'implicito riduzionismo dell'approccio chimico al vivente.

L'autore sviluppa una riflessione secondo le parole chiave: vivente, complessità, organizzazione, sistemica, complessità sistemica, molecola, riduzionismo, chimica biologica, biochimica, biologia molecolare.

* Istituto di Chimica dei Composti Organo-Metallici – ICCOM, CNR U.O.S. di Pisa

Il rapporto tra la chimica e il vivente è sempre stato fondamentale. È oggi ben noto che molta parte delle spiegazioni biologiche si fondano sulla chimica, ma raramente ci si è posto il problema di capire perché l'approccio chimico alla biologia è così diffuso e produttivo. In questo lavoro cercheremo di mostrare perché la chimica, e il suo approccio al mondo, sia essenziale in biologia. Per fare questo dovremo accennare brevemente alla specificità dell'approccio chimico e seguire l'evoluzione del rapporto della chimica con la biologia.

Oggi giorno la situazione è complessa sia nelle discipline scientifiche sia nella loro caratterizzazione epistemologica. Dopo i profondi cambiamenti di prospettiva della seconda metà del Novecento, imposti dalla nascita delle «Scienze della complessità» e della Sistemica, che io ho riassunto nella dizione di «complessità sistemica» [Villani, 2008a], molti problemi di base della scienza, e tra questi anche il rapporto tra le discipline, necessitano di una rilettura [Villani, 2008b].

Fino alla prima metà del XX secolo (e, per molti aspetti, ancora oggi nella pratica scientifica), il concetto di «sistema», nell'accezione di ente strutturato e/o organizzato, è stato a lungo sottovalutato nell'ambito fisico e chimico [Morin, 2001].

La sua importanza, invece, nella biologia e nelle scienze umane e sociali è assodata e, anche quando in tali discipline si è esplicitamente negato tale concetto, il concetto di sistema è sempre riemerso in un modo o nell'altro. Si può dire che il differente approccio a questo concetto fondamentale sia stato, se non la causa, sicuramente uno degli elementi che hanno distanziato le scienze della materia inanimata da quella animata e umana. Si supponeva (o si assumeva) che, da un lato esistevano i sistemi della fisica e della chimica, sicuramente scomponibili nei loro costituenti e dall'altro gli organismi viventi, in cui era evidente l'impossibilità della scomposizione, pena la morte del sistema. Tale differenza si radicalizzava passando alle scienze umane e sociali,



Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794)

con l'individualità e irriducibilità di ogni ente o processo.

In realtà, la chimica è da tempo la disciplina scientifica che opera sia nel piano macroscopico sia in quello microscopico con l'ausilio di concetti sistemici. Anche senza saperlo, quando nella seconda metà del XIX secolo furono elaborati nella forma attuale i concetti di «composto chimico» e di «molecola», nacque la prima scienza sistemica: la chimica [Villani, 2010].

Nella rimozione della dicotomia tra il vivente e il non-vivente, quindi, essa può svolgere un duplice ruolo. La sua autonomia, la sua irriducibilità alla fisica, moltiplica e stempera le differenze.

L'idea è che gli enti strutturati/organizzati sono presenti in tutti gli ambiti e, quindi, creano differenze epistemologiche e non dicotomie. Dall'altro lato, nella pratica scientifica di tutti i giorni, essa come scienza sistemica lavora con un mondo pluralistico in cui milioni di enti (molecole/composti) sono soggetti e oggetti di spiegazione e fa da ponte tra il mondo «semplice» (degli universali) della fisica e quello «prorompente» (e plurale) della biologia.

Non è questo il posto dove trattare in dettaglio l'approccio chimico sia al mondo inanimato sia a quello vivente. Per una trattazione dettagliata della mia posizione, ci si può riferire a [Villani 2001, 2008b].

Qui riassumiamo le principali caratteristiche dell'approccio chimico che ci possono interessare nello studio dei problemi biologici.

- I composti e le molecole sono sistemi, nell'ottica della *Teoria Generale dei Sistemi*. Essi sono entità che, sebbene costituite da parti (elementi e atomi), trascendono i loro componenti creando una nuova entità globale.

C'è una chiara differenza tra un miscuglio d'idrogeno e ossigeno e il composto chimico chiamato acqua, formato da idrogeno e ossigeno in una specifica proporzione.

Tutte le proprietà intensive del miscuglio d'idrogeno e ossigeno sono una media pesata delle proprietà dei costituenti e quelle estensive la somma, ma le proprietà intensive ed estensive dell'acqua sono completamente differenti.

- Paragonando la chimica alla fisica e alla biologia, vediamo che la chimica dà la stessa importanza ai concetti di ente (atomi, molecole, elementi, composti, eccetera) e alla loro trasformazione (reazione chimica).

In fisica, invece, sono essenziali i processi e le entità praticamente spariscono (ci sono le sostanze chimiche, ma non la sostanza fisica); in biologia, invece, ci sono casi in cui le trasformazioni di un ente in un altro, come le specie biologiche, avvengono in una scala di tempi troppo grande (rispetto alla scala di tempi interni al sistema).

Questo ha permesso di considerare le specie biologiche immutabili, come la storia della biologia ci mostra, mentre mai in chimica si è assunto che i composti non potessero trasformarsi gli uni negli altri.

- In un ambiente di reazione complesso (come nella cellula) è possibile avere dei cicli di reazioni che trasformando i reagenti in prodotti alla fine ritornano ai reagenti.

Questi cicli giocano un ruolo fondamentale nei viventi, come sottolineato dalla *Teoria Autopoietica* di Humberto Maturana e Francisco Varela (1946-2001) o dalla *Teoria degli Ipercicli* di Stuart Kauffman (1939-).

- Il mondo chimico è popolato da milioni d'individui, qualitativamente differenti. Queste «entità» diventano gli «oggetti» da comprendere e i «soggetti» con cui studiare il mondo materiale, sia esso vivente o no. Di conseguenza, la spiegazione chimica è differente da quella fisica incentrata sul concetto di legge di natura.

Il concetto sistemico di ente chimico (il sistema strutturato/organizzato), infatti, consente una spiegazione della realtà fatta attraverso la presenza e le relative proprietà statiche e dinamiche di queste entità.

L'approccio fisico, privilegiando i processi, favorisce l'aspetto dinamico del mondo. Nel mondo chimico, invece, enti e processi, aspetti statici e dinamici, sono sullo stesso piano e questo è uno dei punti di forza della spiegazione chimica del vivente.



Humberto Maturana (1928- ...)

Approccio chimico al vivente. Dalla chimica biologica alla biologia molecolare

La chimica biologica, la biochimica e la biologia molecolare formano un *continuum* nel quale è difficile stabilire dei limiti stretti che definiscono ciascuna di esse. Tuttavia, sebbene questi tre ambiti abbiano una grande parentela, essi rappresentano anche tre approcci chimici diversi al vivente e lungo il percorso ideale che dalla chimica biologica va alla biologia molecolare si ha un aumento dell'importanza del concetto di organizzazione.

Guardandole un po' più da vicino, la chimica biologica studia il vivente non preoccupandosi affatto dell'organizzazione e delle strutture dove si sviluppano le reazioni chimiche, il vivente è un sacco di reazioni chimiche disordinate.

La biochimica inizia a occuparsi dell'organizzazione grazie alla nozione di enzima. Gli enzimi, con la loro specificità, introducono un certo ordine nelle reazioni: non tutte le reazioni chimiche si realizzano perché alcune sono privilegiate attraverso la catalisi enzimatica. Poiché la loro attività è funzione della loro struttura, compare una certa nozione di ordine strutturale e la cellula diviene un sacco di enzimi, dove ciascuno ha una sua specificità e una sua organizzazione definita.

Infine, la biologia molecolare fa della struttura delle molecole e della loro organizzazione il suo oggetto principale: prima, legando l'attività enzimatica alla struttura geometrica delle proteine (stereochimica), poi introducendo la nozione di regolazione allosterica dell'attività enzimatica (regolazione dovuta al cambiamento della forma dell'enzima) e infine legando l'ereditarietà alla struttura molecolare degli acidi nucleici, considerati come la materia genetica.

La chimica biologica

Da una chimica biologica, quindi, vicina alla chimica organica si è a poco a poco passati a uno studio della fisiologia cellulare fondata sulla chimica, organizzata e regolata dalla geometria delle molecole, una chimica che è, dunque, molto lontana dalla chimica classica e dalle sue leggi statistiche che si applicano a una reazione, vista come popolazioni di molecole disordinate e senza organizzazione.

Infine, si è passati a una macchina molecolare, dove la forma delle molecole costituisce la base dell'organizzazione.

Un buon esempio di un problema della chimica biologica è lo studio della fermentazione. Per Justus von Liebig (1803-1873) la spiegazione di tale processo era puramente chimica, dovuta a un movimento molecolare.

Dall'altra parte, c'era Theodor Schwann che riteneva che la fermentazione richiedesse microorganismi vivi (il lievito). Per Liebig, non era necessario nessun vivente nella fermentazione. Per lui il lievito era in decomposizione e il movimento di questa decomposizione, trasmesso allo zucchero, lo trasformava in alcool.

In questo Liebig era lontano anche da Louis Pasteur (1822-1895) che poi imporrà, contro Liebig, la spiegazione della fermentazione come un'attività vitale del lievito, che significava un ricorso a una spiegazione irriducibile alla sola chimica.

Le fermentazioni sono state uno degli oggetti principali della chimica biologica della prima metà del XIX secolo, ma non sono state il solo oggetto. La chimica biologica, infatti, cercava di spiegare anche le diverse funzioni fisiologiche (e Antoine de Lavoisier era stato il primo in questo campo studiando la respirazione) e, da un certo punto in poi, anche di sintetizzare artificialmente molecole d'interesse biologico.

Nel XIX secolo il più importante tentativo di studio delle funzioni fisiologiche fu quello dello studio della digestione e tra le sintesi di molecole d'interesse biologico la più famosa fu quella dell'urea nel 1828 da parte di Friedrich Wöhler (1800-1882).

La chimica biologica, inoltre, si occupò dell'analisi della materia dei viventi, identificando le differenti classi di composti.

La biochimica

È difficile fissare una data di nascita della biochimica perché si è a lungo sovrapposta alla chimica biologica. Fu probabilmente la scoperta delle proteine e della loro azione enzimatica il punto di cesura tra la chimica biologica e la biochimica. Da questo momento, infatti, sono studiate delle reazioni chimiche specifiche dei viventi, quelle catalizzate dagli enzimi.

Questo portò nella seconda parte del XIX secolo a un risorgere delle idee che legavano la vita a una sostanza speciale, in questo caso identificata con le proteine, come nel caso delle teorie protoplasmatiche di Ernst Haeckel (1834-1919) e seguaci,



Theodor Schwann (1810-1882)

dove il protoplasma era composto principalmente (anche se non esclusivamente) di proteine.

Queste teorie si sono prolungate nel XX secolo, dove le proteine saranno considerate come le molecole caratteristiche della vita, fino agli anni Cinquanta, momento in cui questo ruolo passò al DNA.

Un ostacolo nella comprensione della catalisi enzimatica fu la difficoltà di capire la natura chimica delle sostanze azotate (proteine), di concepirle come differenti sostanze e come macromolecole distinte e, nel caso degli enzimi, di capire la loro specificità all'interno di un complesso di reazioni (metabolismo).

Quest'ostacolo prese la forma di una teoria importante alla fine del XIX secolo e all'inizio del XX, la teoria dei colloidali. Lo stato colloidale è uno stato vischioso, gelatinoso, intermedio tra lo stato solido e quello liquido.

Nella seconda metà del XIX secolo era apparsa la teoria del protoplasma (Ernst Haeckel e Thomas Huxley), teoria che considerava il supporto elementare della vita come una sorta di gel. La teoria dello stato colloidale si riallacciava a questa teoria.

Lo stato colloidale era uno stato dinamico, uno stato energetico, la cui energia si dissipava nei processi vitali.

Il problema generale è che la materia allo stato solido ha una forma fissata e non possiede un suo tempo di modifica, mentre allo stato liquido non ha una propria forma e neppure una sua temporalità perché tutte le modificazioni sono troppo rapide, quasi istantanee.

Per schematizzare le attività della materia vivente, occorre invece qualcosa d'intermedio e fu trovato nello stato colloidale. La materia allo stato colloidale ha una certa forma, ma essa può cambiare in un tempo determinato, abbastanza lento da poter essere studiato. Lo stato colloidale concilia, quindi, la forma e la temporalità, con la creazione di tempi specifici.

Un altro punto essenziale era il rapporto tra il vivente e l'ambiente e, anche in questo caso, lo stato colloidale aveva le giuste caratteristiche. La forma dei colloidali, infatti, è suscettibile di trasformazione sotto l'effetto di diverse azioni esterne (la temperatura, per esempio) e la materia colloidale ha, quindi, una certa «sensibilità» a queste proprietà.

Tutto ciò collegava la materia colloidale alla vita.

Lo stato colloidale era adatto alla vita, perché non troppo organizzato né troppo disorganizzato ed era il posto dove i processi potevano interagire, tramite l'intermediazione delle modifiche fisiche del substrato attraverso cui diffondevano le sostanze.

La biologia molecolare

Venendo alla biologia molecolare, essa utilizzerà principalmente un altro mezzo per introdurre nella biologia l'organizzazione dello stato solido, passando dal livello delle soluzioni (colloidali) alle molecole individuali, alla loro forma, alla loro configurazione spaziale, e al ruolo che questa (come un'organizzazione «solida») gioca nella loro reattività chimica.

In altre parole, l'organizzazione che si considera adesso non è l'organizzazione dell'organismo, ma quella della molecola, la forma di quest'ultima considerata come un solido. Affinché la biologia molecolare si potesse sviluppare, occorre che le diverse proteine non fossero più considerate come un substrato gelatinoso indistinto, ma come tante molecole differenti, ognuna con una sua forma ben definita, ma suscettibile di modificarsi sotto l'azione di diversi agenti.

Questa forma della molecola e la sua «sensibilità» agli agenti, vanno allora a giocare nell'organizzazione delle reazioni chimiche, il ruolo che giocava, nella teoria dei colloidali, il trasporto dei fluidi e la sua sensibilità ai diversi agenti.

Il problema che cerca di risolvere la biologia molecolare è quello di capire come una chimica, considerata estranea al concetto di organizzazione, possa spiegare la vita in cui tale concetto è sicuramente presente. Dietro a questo problema c'era l'idea che le trasformazioni chimiche erano intese/comprese esclusivamente in fase gassosa, cioè come lo studio statistico della reattività chimica.

Questo si vede molto bene in Frederick Donnan che, in una citazione del 1918 che riportiamo [Donnan 1918, pp. 284-286], mostra chiaramente che sia la molecola sia la cellula necessitano del concetto di organizzazione, ma anche che la chimica di quel periodo non è in grado di evidenziare l'organizzazione molecolare. Anche Erwin Schrödinger (1887-1971) [Schrödinger 1944, Cap. 1] enfatizzò quest'idea di Donnan.



Thomas Henry Huxley (1825-1895)



Frederick George Donnan
(1870-1956)

Riportiamo, dunque, questa citazione e la analizziamo un po' in dettaglio perché l'autore coglie bene uno degli snodi essenziali del rapporto tra la chimica e la biologia: l'ottica sistemica della chimica, quella che si basa sulla struttura/organizzazione molecolare, è la sola che ci permette di capire, nell'ottica sistemica, lo studio del vivente. Donnan dice:

«Un gran numero di biologi e fisiologi sostiene che le leggi della fisica e della chimica sono sufficienti per spiegare come si comportano le cellule viventi. Tuttavia, nonostante i grandi progressi già compiuti in questo modo, molti biologi ritengono che manchi qualcosa in questo punto di vista.

Per esempio, avvengono talvolta discussioni sulla validità dell'applicazione del secondo principio della termodinamica agli organismi viventi, alle cellule viventi, eccetera [...] L'aspetto essenzialmente "biologico" della scienza delle cose viventi consiste nel fatto che questa scienza si occupa fundamentalmente, non di medie statistiche, ma di sequenze di eventi su specifiche unità individuali.

Se una cellula vivente può essere vista come una semplice collocazione, come uno sordinato assemblaggio di un enorme numero di molecole e di atomi chimici, le leggi statistiche della scienza fisico-chimica si applicano indubbiamente a essa, e anche la seconda legge della termodinamica. Ma una cellula vivente è molto più che tale assemblaggio non coordinato; è un individuo organizzato, una vera e propria "molecola" biologica.

Come possiamo aspettarci che le leggi statistiche della scienza fisico-chimica di oggi descrivano completamente il modo in cui si comporta una particolare molecola biologica?

Per esempio, una molecola di benzene è anch'essa un individuo organizzato, un individuo che possiede un'organizzazione atomica interna. Ma noi siamo in ignoranza quasi completa sulla particolare sequenza di eventi concernenti una particolare molecola di benzene. Sebbene le equazioni chimiche che esprimono come il benzene si comporta in determinate condizioni ambientali siano scritte come se si applicassero al modo in cui si comporta una particolare molecola determinata, esse non sono altro in realtà che la formulazione di medie statistiche, sotto la quale vi è una vasta area inesplorata di leggi relative agli individui.»

In questa citazione sottolineiamo due cose.

Il primo punto è per noi quello più importante: la molecola è un insieme strutturato di atomi, un individuo organizzato, come la cellula lo è di molecole, ed è questa similitudine, questo loro essere «sistema strutturato/organizzato» che rende la molecola una buona base di spiegazione del vivente.

Nella parte finale della citazione Donnan ci dice che al momento (inizio del Novecento) la chimica non va oltre le leggi statistiche per capire la reattività di una molecola, non riesce a studiare l'organizzazione individuale ed è implicito che, quando la chimica sarà in grado di studiare le singole molecole e mostrarne l'organizzazione, tutto ciò si ripercuoterà anche in biologia.

Conclusioni

In questo lavoro siamo partiti dalla constatazione che il panorama culturale delle scienze contemporanee si è modificato con l'emergere di due questioni generali: quello della complessità e quello della sistemica, che abbiamo sintetizzato nel termine di «complessità sistemica».

Poi, abbiamo evidenziato che la chimica può essere considerata la prima scienza della complessità sistemica e ne abbiamo caratterizzato il suo approccio. Lungo, poi, la storia dell'approccio chimico al vivente, abbiamo analizzato il passaggio dalla chimica biologica, alla biochimica e, infine, alla biologia molecolare.

Lungo la storia della biologia, nella spiegazione del vivente l'alternativa è sempre stata (esplicitamente o implicitamente) tra una visione «passiva» della materia e con proprietà (come la vita) generate dalla sua organizzazione (meccanica) spaziale e una visione «attiva» della materia (come quella chimica), ma le cui proprietà (compresa la vita) dovevano essere inglobate negli elementi costitutivi, fossero essi le particelle vive o una materia organica specifica [Pichot, 2011].

Queste due strade alternative sono sempre state presenti anche in chimica, dove l'ottica atomica e la sua organizzazione spaziale nelle molecole non sono mai riuscite a spiegare il «nuovo» che emergeva quando si formava una molecola.

L'ottica sistemica, quella della complessità sistemica, invece, ci dice che ogni ente

strutturato/organizzato, ogni sistema, è differente dai costituenti e le sue proprietà non sono collegate linearmente a quelle dei costituenti e questo vale sia per il sistema-molecola sia per il sistema-cellula. Gli enti costituenti hanno, infatti, loro specifiche proprietà (non è materia passiva), ma quando si mettono insieme per formare un nuovo sistema, si ottiene l'emergere di nuove proprietà.

Per spiegare il «nuovo» che emerge, occorre mettere in evidenza che i costituenti sono essi stessi dei sistemi e che, in virtù della loro struttura/organizzazione, si modificano nell'entrare nella composizione del nuovo sistema.

Tirando le conclusioni, possiamo dire che l'approccio chimico della complessità sistemica allo studio del vivente può essere visto come la sintesi di queste due strade che, altrimenti, sebbene copresenti, sono parziali e rischiano di restare contrapposte.

L'opposizione quindi, tra proprietà e organizzazione, tra materia attiva e passiva, è eliminata dicendo che è vero che le caratteristiche originali dei costituenti (le loro proprietà e la loro attività) preesistono al sistema, ma esse sono modificate per avere nuove proprietà e attività dall'organizzazione che, tuttavia, non va intesa come semplice organizzazione spaziale e meccanica.

In pratica, abbiamo sistemi che, interagendo, costituiscono nuovi sistemi: sistemi-atomi che formano sistemi-molecole, sistemi-molecole che costituiscono sistemi-cellule, eccetera.

Giovanni Villani

(Istituto di Chimica dei Composti Organo- Metallici – ICCOM, CNR U.O.S. di Pisa)

Note Bibliografiche

Donnan F. G. (1918), *La science physico-chimique décrit-elle d'une façon adéquate les phénomènes biologique?*, *Scientia*, 24: 282-288.

Morin E. (2001), *Il metodo 1. La natura della natura*, Milano, Raffaello Cortina.

Pichot A. (2011). *Expliquer la vie. De l'âme à la molécule*, Versailles, Quae.

Schrödinger E. (1944). *What Is Life?*, Cambridge (UK), Cambridge University Press.

Villani G. (2001). *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*, Napoli, CUEN.

Villani G. (2008a). *Complessità sistemica. Un'ottica diversa da cui guardare il mondo*, *Complessità*, 1-2: 88-100.

Villani G. (2008b). *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*, Milano, Franco Angeli.

Villani G. (2010). *La chimica: una scienza della complessità sistemica ante litteram* in Urbani Ulivi L. (a cura di) *Strutture di mondo. Il pensiero sistemico come specchio di una realtà complessa*, B

